

Experimental Investigation on Simultaneous Removal of SO₂ and NO_x by Solutions of Urea and Ammonium Ion/Additives

Jianpu Yin, Yuanquan Xiong, Hongyin Xie, Zhanfei Shi

School of Energy and Environment Southeast University, Thermoenergy Engineering Research Institute, Jiangsu, Nanjing 210096

Abstract: This article introduces mass transfer theory of the SO₂ and NO_x liquid absorption and correlation analysis. Simultaneous desulfurization and denitrification with simulated gas wet denitrification using three different combinations of urea and ammonium ion as absorbent has been investigated in a set of two sprinkling absorption reactors filled with steel pall rings in series. A series of experimentations are carried out to research the effect of multi-parameters on the NO_x removal, such as gas velocity, L/G ratio, absorbent concentration, gas temperature, absorbent temperature, additive concentration, SO₂ concentration and NO_x concentration. The experimental results indicate that urea solution on NO_x removal is higher than that of ammonium ion solution. At the same time, gas velocity and L/G ratio have important effects on the removal efficiency of SO₂, and gas velocity, L/G ratio, system temperature, additive concentration, SO₂ concentration and NO_x concentration have important effects on the removal efficiency of NO_x from flue gas. Based on those results, the optimum operating parameters are obtained; it shows the removal efficiency of SO₂ and NO_x from flue gas can reach about 95% and 60%, respectively. The results also show the mutual promotion effects when SO₂ and NO_x are in the same system.

Keywords: urea; ammonium ion; wet; desulphurization; denitrification

尿素、铵根离子溶液/添加剂湿法同时脱硫脱硝试验研究

印建朴, 熊源泉, 谢红银, 史占飞

东南大学能源与环境学院, 热能工程研究所, 南京, 210096

摘要: 本文对 SO₂ 和 NO_x 在液相吸收过程中的传质过程进行了分析; 采用尿素和铵根离子组合成的三种不同吸收剂, 在填有金属鲍尔环的串联喷淋吸收塔反应器中, 对模拟烟气进行湿法同时脱硫脱硝的研究; 试验分别对气速、液气比、吸收剂浓度、气体温度、吸收剂温度、添加剂浓度、SO₂ 浓度和 NO_x 浓度等参数对吸收 SO₂ 和 NO_x 反应的影响规律进行了研究。研究表明: 铵根离子溶液的脱硝效率不如尿素溶液的脱硝效率, 并且气速和液气比对脱硫效率有重要影响; 气速、液气比、系统温度、添加剂浓度、SO₂ 浓度和 NO_x 浓度均对脱硝效率有显著影响。在最佳条件下, 其脱硫效率为 95% 左右, 脱硝效率最高达到 60% 左右。

关键词: 尿素, 铵根离子, 湿法, 脱硫, 脱硝

引言

目前, 湿法同时脱硫脱硝技术已成为目前研究的一个重点领域, 具有设备简单、操作管理方便、占地面积小、投资运行费用低等优点, 受到广泛关注。与此同时, 有研究表明同时脱硫脱硝吸收反应的速率常数大于烟气单独脱硫吸收反应的速率常数和烟气单独脱硝吸收反应的速率常数之和, 这说明烟气同时脱硫脱硝吸收反应过程中各反应有协同促效的作用, 比单独脱硫、脱硝具有更高的净化

效率。目前, 人们正致力于开发符合我国国情的新型湿法同时脱硫脱硝技术。

在国外, 与尿素有关脱硫脱氮技术多用于炉内脱硫脱氮, 瑞典Lund大学进行了尿素/石灰石吸附剂炉内同时脱硫脱氮的试验^[1], 日本有类似的研究专利^[2], 美国有人使用醋酸钙镁(含C=O基)进行炉内干法同时脱除SO₂和NO_x的研究^[3], 另外, 有报道^[4]美国纽约一电厂烟气经石灰湿法脱硫后再用尿素脱氮。

在国内, 贾瑛^[5]等(2002)对酸性尿素水溶液

处理导弹氧化剂废水中 NO_x 进行了研究（其氧化度超过60%），在实验条件下对 NO 的去除率可达99.5%。曹忠宇^[6]（1999）和王军^[7]等（2003）对酸性尿素溶液作吸收液还原吸收处理间歇性、高浓度氮氧化物废气做了研究，由于对 NO_x 的去除率可在较大的 NO_x 浓度范围内保持稳定，因此对治理间断地、非均匀排放 NO_x 工业废气具有较好的效果。王树江^[8]等（2004）研究了尿素水溶液对二氧化碳气体中氮氧化物的去除。

岑超平（2000~2006）等^[9-13]向尿素溶液中加入添加剂，研究了脱硫脱氮反应热力学、尿素消耗动力学及净化过程中 SO_2 和 NO_x 的吸收特性，结果表明，在实验条件下，反应过程中脱硫和脱氮吸收反应有协同作用。以 SO_2 体积分数0.1%和 NO_x 体积分数0.08%的气体为模拟烟气， NO_x 的氧化度为5%左右，气液接触反应温度为 20°C ，吸收塔有效高度为1.8m，添加剂三乙醇胺的质量浓度为 100mg/L ，吸收液尿素质量分数为5%~30%，在 $\phi 16\text{mm}$ 的不锈钢金属鲍尔环填料吸收塔反应器中，进行的同时脱硫脱氮的实验结果表明， SO_2 的脱除率波动很小，脱硫效率接近99%； NO_x 脱除率随尿素的质量分数的增加而增加。

本文采用尿素作为吸收剂，三乙醇胺作为添加剂对湿法脱硝机理进行了研究，通过实验一方面控制不同的操作参数，确定各种操作条件（有无 O_2 、有无 SO_2 、有无添加剂（三乙醇胺）、尿素浓度、亚硫酸铵对氮氧化物脱除效率的影响规律；另一方面通过分析溶液离子成份，试确定主要影响因素和脱硝反应机理。

1 液相传质吸收理论

我们可以根据应用广泛且较成熟的双膜理论（1923年由W.K.Lewis和W.G.Whitman提出）^[14-15]来解释 SO_2 和 NO_x 的液相吸收控制理论。它不仅适用于物理吸收，也适用于气液相反应。

SO_2 和 NO_x 的液相吸收可以简化为经气液两膜层的分子扩散，这两薄膜构成了吸收过程的主要阻力，溶质以一定的分压及浓度差克服两膜层的阻力，膜层以外几乎不存在阻力。气体在吸收过程中所受到的阻力可以用下式表示为：总阻力=气膜阻力+液膜阻力

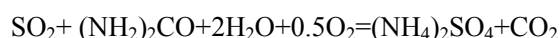
$$\text{即 } \frac{1}{K_L} = \frac{H}{k_G} + \frac{1}{k_L}$$

由于 SO_2 在水中的溶解度很大，即H值很大，液膜传质阻力 $1/Hk_L$ 比气膜传质阻力 $1/k_G$ 小很多，可简化为： $K_G \approx k_G$ 。此时，传质阻力集中于气膜中，由

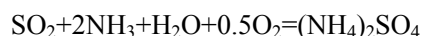
气膜控制。由于 NO_x 在水中的溶解度很小，即H值很小，气膜阻力 H/k_G 比液膜阻力 $1/k_L$ 小很多，上式可简化为： $K_L \approx k_L$ ，此时，传质阻力集中于液膜中，可见 NO_x 吸收过程主要由液膜控制。所以液膜控制时，要提高传质吸收速率，关键提高总传质系数 K_L ，这就必须增大液相湍动程度，增大吸收推动力，增大填料层内有效接触面积均可以增大传质吸收速率，从而提高湿法脱硝效率。

2 反应原理

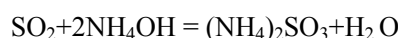
尿素溶液吸收法脱硫脱硝的反应机理如下：



铵根溶液脱硫脱硝反应机理如下：



当铵根溶液经脱硫后所生成的亚硫酸铵又具有脱硝能力，其发生的化学反应方程式为：



3 实验部分

3.1 实验系统

实验系统如图1所示，包括模拟烟气系统、吸收系统、测量系统、烟气检测系统。

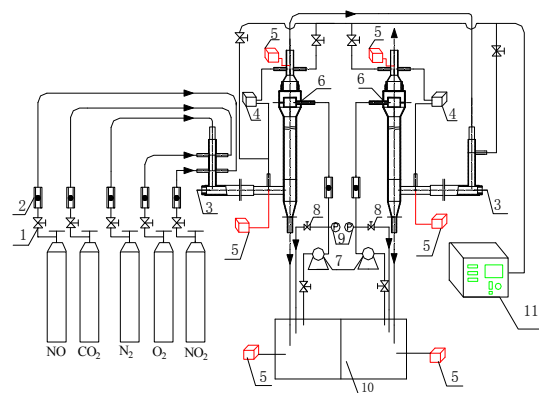


Fig. 1 Diagram of the reaction apparatus of flue gas denitrification

- 1、 Pressure reducing valve; 2、 Flow meter; 3、 Gas heater;
- 4、 Differential gauge; 5、 Thermometer; 6、 Packed Tower;
- 7、 Magnetic pump; 8、 Needle valve; 9、 Pressure meter;
- 10、 Liquid tank; 11、 Gas analyzer

模拟烟气系统：分别控制氮气、氧气、二氧化碳、一氧化氮、二氧化氮减压阀，调节流量计的流量到稳定状态，配置成实验设计的模拟烟气组分。

吸收系统：吸收塔是直径为 39mm，有效高度为 1.8m 的不锈钢材料制成，塔内乱堆填满规格为 16mm×16mm×0.4mm 的金属鲍尔环，在烟气入口上端设置了布气板，在烟气出口上端布置了除雾器，除去烟气中夹带的水蒸气，最后气体由塔顶排出去。用水泵将吸收液从配液槽抽出，由流量计控制流量打入填料塔，吸收液通过填料，从出水管流出塔后再流回配液槽循环使用。

测量系统：分别在烟气加热管内和储液罐内布置电加热管，使用 Pt100 热电阻传感温度至温度显示仪。用 U 型测压计在入口和出口处检测压力降。

烟气检测系统：分别在烟气入口处，一级塔出口处，二级塔出口处设置烟气检测口，用德国 MRU 公司的 SAE-1999 型烟气分析仪分析烟气组分。

3.2 实验条件

(1) 本文中模拟烟气的 NO_x 的氧化度 (NO₂/NO_x 的值) 定为 6%。

(2) 采用三乙醇胺作为添加剂。

(3) 配制三种不同类别的吸收液：

a、一级塔水槽和二级塔水槽均为碳酸氢铵吸收剂、三乙醇胺作为添加剂溶液。记作：“1#”吸收剂。

b、一级塔水槽为碳酸氢铵吸收剂、三乙醇胺添加剂溶液；二级塔水槽为尿素吸收剂、三乙醇胺添加剂溶液。记作：“2#”吸收剂。

c、一级塔水槽和二级塔水槽均为尿素和碳酸氢铵混合溶液作为吸收剂、三乙醇胺作为添加剂溶液。记作：“3#”吸收剂。

4 实验结果与讨论

4.1 气速对同时脱硫脱硝效率的影响

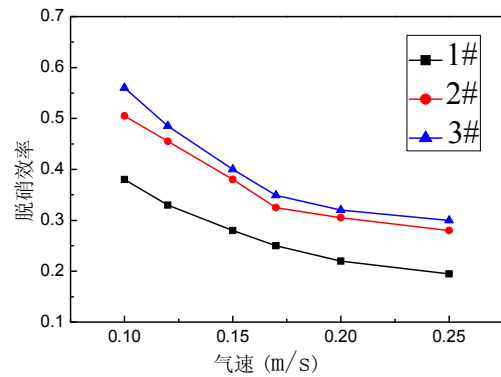
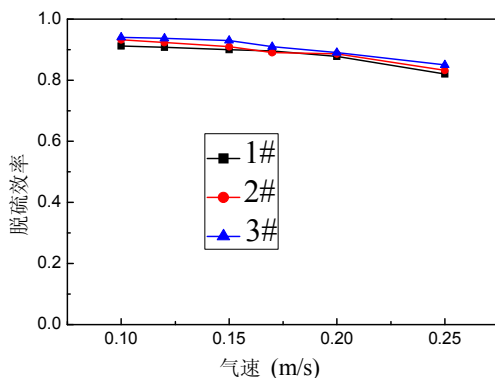
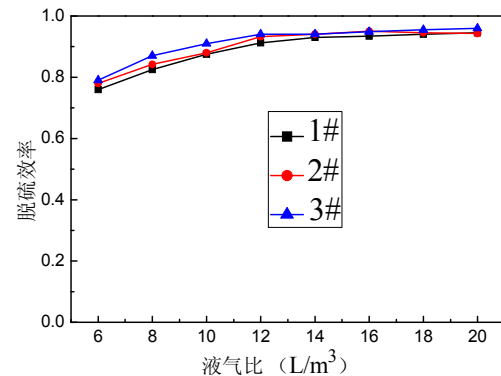


Fig. 2. Effect of gas velocity on SO₂/NO_x removal

[SO₂ 2000ppm; NO 1000ppm 左右;氧化度 6%; O₂ 浓度 5%;CO₂ 浓度 15%;液气比 12L/m³;添加剂 0.015%(质量比); 图中 1# 和 2# 吸收剂各塔浓度均为 6%;3 # 吸收剂中尿素浓度为 3%,碳酸氢铵浓度为 3%;环境温度]

图 2 的实验结果表明：气速增大，脱硫效率下降较缓慢，约下降了 8%~10%，但气速对脱硝效率的影响较显著，随着气速的增大，脱硝效率急剧降低。单独从 1#、2#、3# 溶液脱硝效率的曲线来看：当气速从 0.1m/s 增加到 0.2m/s 时，脱硝总效率下降了约 18%；当气速从 0.2m/s 增加到 0.25m/s 时，总效率下降的比较缓慢约 2%。原因在于塔内气速的增加，烟气在吸收塔中的停留时间缩短，与吸收剂接触的时间降低，导致吸收剂的利用率降低，但又由于塔内气速的提高时，可使气液两相扰动剧烈程度和相传质系数、液相传质系数显著增加，有利于传质，故脱硝效率下降会出现比较缓慢的现象。从图中三条曲线比较可以看出：1# 吸收剂的脱硝效率明显低于 2# 和 3# 吸收剂的脱硝效率，说明尿素的加入会提高 NO_x 的去除率，尿素对 NO_x 的还原性要好于碳酸氢铵对 NO_x 的还原性，碳酸氢铵在单独脱硝系统中可能仅仅依靠自身的弱碱性吸收部分 NO_x 的。

4.2 液气比对同时脱硫脱硝效率的影响



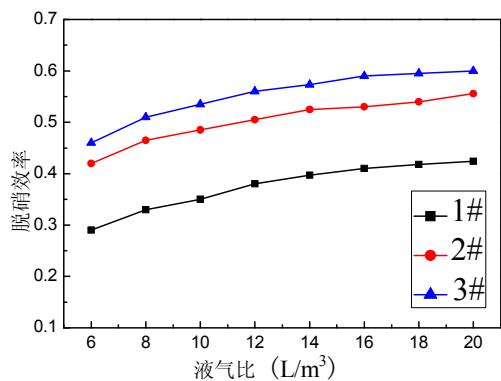


Fig. 3. Effect of L/G ratio on SO₂/NO_x removal [SO₂ 2000ppm; NO 1000ppm 左右;氧化度 6%; O₂ 浓度 5%;CO₂ 浓度 15%;气速 0.1m/s; 添加剂 0.015%(质量比); 图中 1# 和 2# 吸收剂各塔浓度均为 6%;3 # 吸收剂中尿素浓度为 3%,碳酸氢铵浓度为 3%;环境温度]

图 3 显示了液气比对同时脱硫脱硝效率的影响较大,随着液气比的增大,脱硫脱硝效率均增加。当液气比从 6 L/m³ 增加到 20L/m³ 时,三种不同吸收剂的脱硫效率分别从 76%、78%、79%提高到 91.5%、94%、95%;脱硝效率增加幅度为 9%~12%左右。增加液气比则增大了吸收过程的推动力,提高了吸收塔内的喷淋密度,液体喷淋量的增加使得填料被充分润湿,在填料层表面形成液膜,使气液接触面积增大,保证气液充分接触反应,有利于 SO₂ 和 NO_x 的吸收。液气比为 14 L/m³ 时,1#、2#、3#吸收剂的脱硫效率均达到了 93%左右,脱硝效率分别达到 36%、48%、53%左右。当液气比小于 14 L/m³ 时,脱硫脱硝效率增加较快;当液气比大于 14 L/m³ 时,脱硫脱硝效率增加相对缓慢。故后续试验采用液气比为 14L/m³。

4.3 吸收剂浓度对同时脱硫脱硝效率的影响

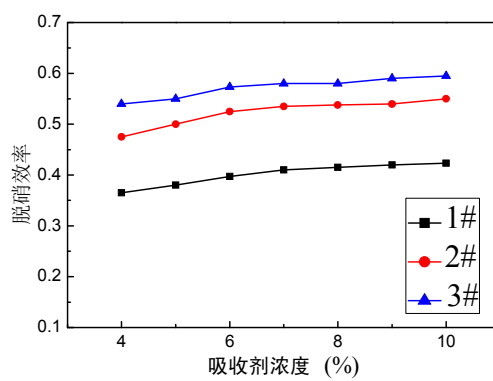
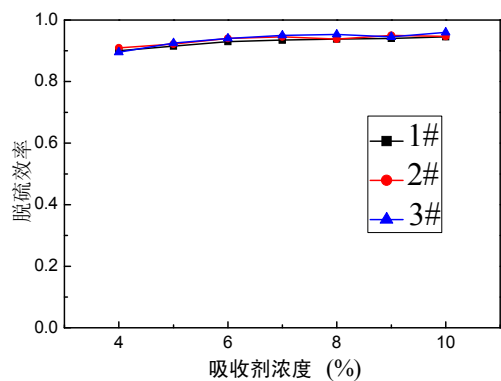


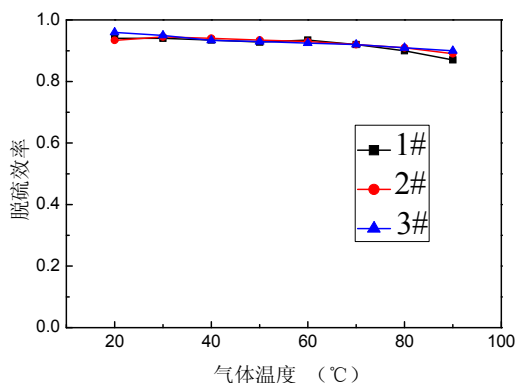
Fig. 4. Effect of absorbent concentration on SO₂/NO_x removal

[SO₂ 2000ppm; NO 1000ppm 左右;氧化度 6%; O₂ 浓度 5%;CO₂ 浓度 15%;气速 0.1m/s;液气比 14L/m³; 添加剂 0.015%(质量比); 图中 1# 和 2# 吸收剂保持两塔浓度相等;3 # 吸收剂两塔中尿和碳酸氢铵含量各占一半;环境温度]

试验结果如图 4 所示,吸收剂含量的高低对 3 种溶液同时脱硫脱硝影响均不显著,随着吸收剂浓度的增大,三种不同吸收剂的脱硫效率基本稳定在 93%左右,但脱硝效率有缓慢增长的趋势,当吸收剂浓度从 4%增加到 10%时,脱硝效率增大了约 4%~6%,其中 2#溶液提高幅度更大些。且 2#和 3#溶液明显高出 1#吸收剂十多个百分点。吸收剂浓度大于 7%以后,3 种吸收液的脱硝效率提升均不是十分明显。

4.4 气体温度对同时脱硫脱硝效率的影响

从图 5 的实验结果表明:烟气温度的三种不同吸收剂脱硝过程中具有相似的规律,当气体温度从 20℃增加到 30℃时,其脱硝效率略微有所提高,温度为 30℃时,1#、2# 和 3# 吸收剂的脱硝效率分别为 41%、53.5%和 58%,当温度增加到 60℃时,2# 和 3# 吸收剂的脱硝效率都降到了最低值,分别为 44.5%和 49.3%,而 1# 溶液在温度增加到 70℃



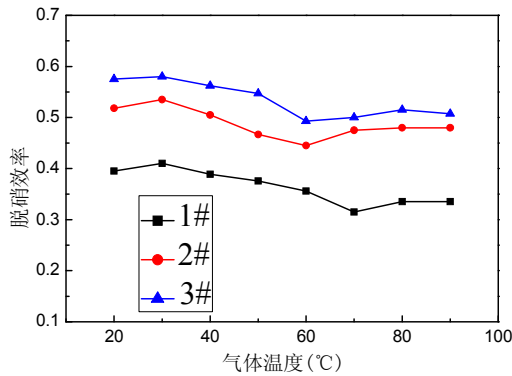
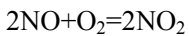


Fig. 5. Effect of gas temperature on SO₂/NO_x removal [SO₂ 2000ppm; NO 1000ppm 左右;氧化度 6%; O₂ 浓度 5%;CO₂ 浓度 15%;车速 0.1m/s;液气比 14L/m³;添加剂 0.015%(质量比); 图中 1# 和 2# 吸收剂各塔浓度均为 7%;3 # 吸收剂中尿素浓度为 3.5%,碳酸氢铵浓度为 3.5%; 溶液温度为环境温度]

时脱硝效率降为 31.5%,当温度继续增加到 90°C 时,其脱硝效率有所回升,逐渐趋于平稳。一方面从物理吸收的角度来看,温度的升高,NO_x 溶解度随之下降,未溶于水溶液的 NO_x 难以得到去除;另一方面从化学吸收的角度来说,NO 氧化成 NO₂ 是放热反应,如下式所示:



$$\Delta_r H_m^0(298.15\text{K}) = -114.14 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

升高温度反应向生成 NO 的方向移动,不利于反应的进行,故反应生成的 HNO₂ 和 HNO₃ 减少,则 NO_x 去除率下降,而当吸收反应温度在 70°C~90°C 时,NO_x 脱除率几乎保持不变,由于温度升高,反应体系内分子的混乱度较高,与其它不利条件进行了一部分抵消,才使得脱硝效率趋于缓和。SO₂ 的脱除受气体温度影响不是很大,略有下降,由于 SO₂ 本身在水中的溶解度就很大,加上 SO₂ 的脱除是一个快速的化学反应,下降可能是由于温度的提高会降低 SO₂ 在水中的溶解度。

4.5 吸收剂温度对同时脱硫脱硝效率的影响

从图 6 中可以看出,吸收剂温度对三种溶液的脱硫效率影响均不大,虽然温度的升高会导致吸收剂的分解,但 SO₂ 本身也易溶于水,在水中的溶解度就很大,故对 SO₂ 的影响不显著。但从脱硝图中可以看到,对 NO_x 的去除还是有一定的影响的,3 种吸收剂的脱硝效率均呈下降趋势,因为 NO 难溶于水,依靠吸收剂的还原作用将其还原成 N₂,从而达到去除的目的,而温度的升高导致了吸收剂的分解速率,对 NO_x 的吸收是不利的。当溶液温度为 20°C 左右时,1#、2# 和 3# 吸收剂的脱硝效率分别

约 41.5%、53.5%和 58%,当吸收剂温度增至 60°C 时,1#、2#和 3# 吸收剂的脱硝效率均下降了 9%~12%左右。因为随着温度的升高,吸收剂开始缓慢分解,影响其吸收效率;而且升高温度,NH₃ 易泄露,污染环境,且三乙醇胺蒸气有毒。故吸收剂温度不宜过高。

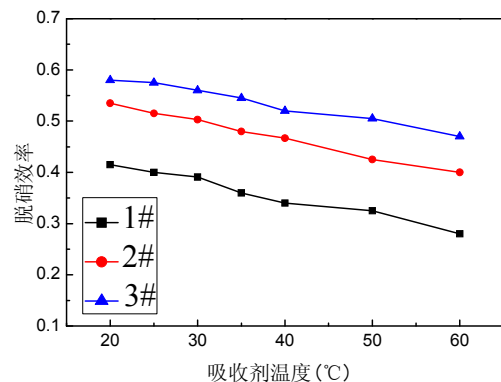
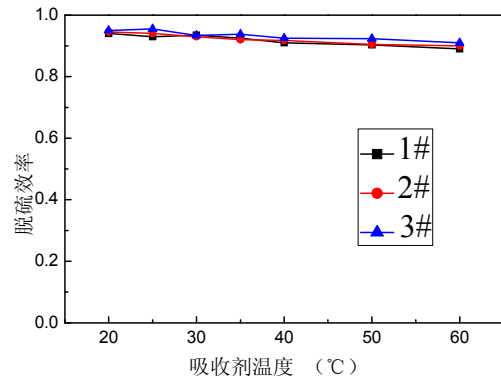
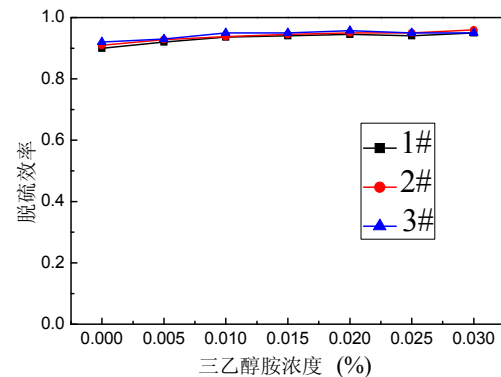


Fig.6. Effect of absorbent temperature on SO₂/NO_x removal [SO₂ 2000ppm; NO 1000ppm 左右;氧化度 6%; O₂ 浓度 5%;CO₂ 浓度 15%;车速 0.1m/s;液气比 14L/m³;添加剂 0.015%(质量比); 图中 1# 和 2# 吸收剂各塔浓度均为 7%;3 # 吸收剂中尿素浓度为 3.5%,碳酸氢铵浓度为 3.5%; 气体温度为 25°C 左右]

4.6 添加剂浓度对同时脱硫脱硝效率的影响



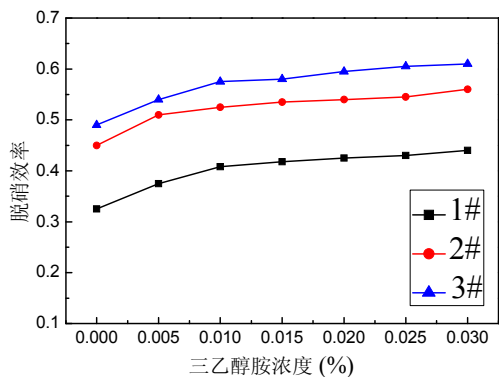


Fig.7. Effect of triethanolamine content on SO₂/NO_x removal

[SO₂ 2000ppm; NO 1000ppm 左右;氧化度 6%; O₂ 浓度 5%;CO₂ 浓度 15%;气速 0.1m/s;液气比 14L/m³;图中 1# 和 2# 吸收剂各塔浓度均为 7%;3 # 吸收剂中尿素浓度为 3.5%,碳酸氢铵浓度为 3.5%;系统温度为 25℃左右]

图 7 显示了三乙醇胺添加剂浓度的提高对三种溶液的脱硫效率影响均很小;而添加剂浓度对三种不同吸收剂的脱硝效率具有显著影响,从图中的曲线可以看出,当吸收剂中无添加剂时,1#、2# 和 3# 吸收剂的脱硝效率分别只有 32.5%、45%和 49%,当添加剂含量从 0 增加到 0.005%时,其脱硝效率均增加了 6%左右,三种溶液提高的幅度基本一样。当添加剂的量继续增加达到 0.03%时,1#、2# 和 3# 吸收剂的脱硝效率分别达到最高,为 44%、56%和 61%。可见,三乙醇胺的加入使得脱硝效率得到了一定的提高,添加剂在烟气净化过程中则起到了催化和缓冲作用,另外,还起到控制反应过程和最终产品的作用。当添加剂含量增加到 0.01%时,继续提高添加剂含量对三种溶液的脱硝效率增幅不是太大,考虑到经济性因素,认为 0.01% 的三乙醇胺含量是一个合理的操作参数。

4.7 SO₂ 浓度对同时脱硫脱硝效率的影响

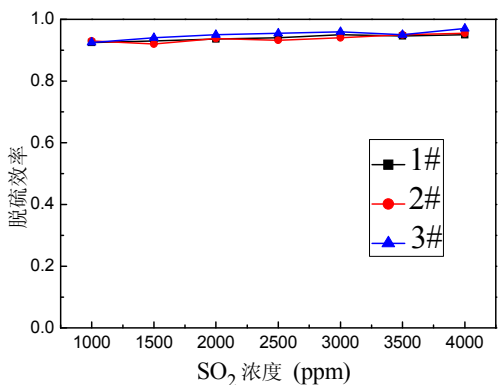
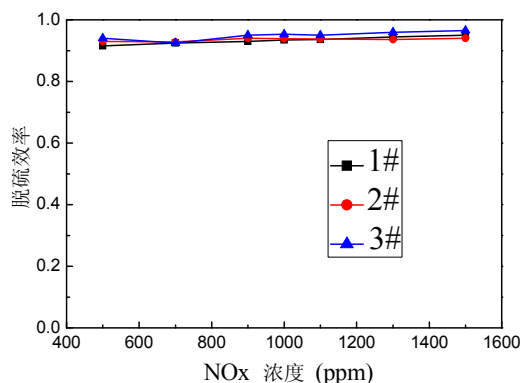


Fig.8 Effect of SO₂ concentration on SO₂/NO_x removal

[NO 1000ppm 左右;氧化度 6%; O₂ 浓度 5%;CO₂ 浓度 15%;气速 0.1m/s;液气比 14L/m³;添加剂 0.01%(质量比);图中 1# 和 2# 吸收剂各塔浓度均为 7%;3 # 吸收剂中尿素浓度为 3.5%,碳酸氢铵浓度为 3.5%;系统温度为 25℃左右]

图 8 试验结果可看出,随着 SO₂ 体积分数的增加,脱硫效率和脱硝效率有所提高,而脱硝效率提高较多。对比脱硝图中的三条曲线,3# 吸收剂的脱硝效率最大,2# 吸收剂的脱硝效率次之,1# 吸收剂的效率最小,除了吸收剂组成不同外,其它试验操作条件均相同,而 2# 和 3# 吸收剂中都含有尿素吸收剂,1# 为单独碳酸氢铵吸收剂,这进一步说明尿素溶液对 NO_x 的去除率优于碳酸氢铵对 NO_x 的去除效率。另外,当 SO₂ 浓度从 1000ppm 增加到 4000ppm 时,三种不同溶液的脱硝效率均增大了 7%~8%。这说明 SO₂ 对 NO_x 的吸收具有促进作用,再者也可能由于 SO₂ 与碳酸氢铵反应生成的亚硫酸铵对 NO_x 有还原作用,即发生如下反应:
 $2NH_4HCO_3 + SO_2 = (NH_4)_2SO_3 + 2CO_2 + H_2O$
 $2NO + NO_2 + 4(NH_4)_2SO_3 = 4(NH_4)_2SO_4 + 1.5N_2$
 提高了对 NO_x 的去除效率。

4.8 NO_x 浓度对同时脱硫脱硝效率的影响



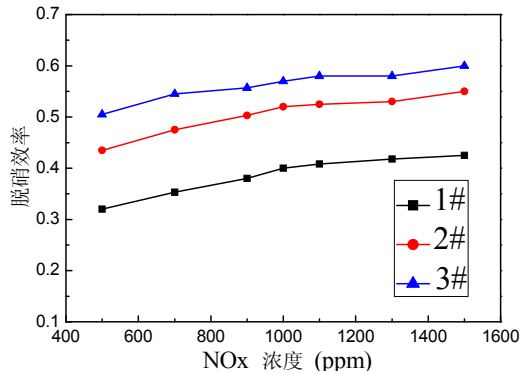


Fig.9 Effect of NO_x concentration on SO₂/NO_x removal [SO₂ 2000ppm;NO_x 氧化度 6%; O₂ 浓度 5%;CO₂ 浓度 15%; 气流速 0.1m/s;液气比 14L/m³; 添加剂 0.01%(质量比); 图中 1# 和 2# 吸收剂各塔浓度均为 7%;3 # 吸收剂中尿素浓度为 3.5%,碳酸氢铵浓度为 3.5%;系统温度为 25℃左右]

随着 NO_x 体积分数的增加,脱硝效率增大,脱硝效率基本维持在 95%左右,试验结果如图 9 所示。当 NO_x 的体积分数在 500ppm 左右时,1#、2# 和 3# 吸收剂的脱硝效率分别在 32%、43.5%和 50.5%左右,当 NO_x 含量增至 1500ppm 时,1#、2# 和 3# 吸收剂的脱硝总效率达到最高点分别为 42.5%、55%和 60%。这是由于气相中的 NO_x 浓度增加,加强了传质推动力,进而加快了 NO_x 吸收速度,提高了 NO_x 的去除率。

5 结论

- 1、随着流速的增大,三种不同吸收剂对二氧化硫的脱除率均呈缓慢下降趋势,其下降幅度为 9%左右,但脱硝效率影响较明显,其下降幅度较大,在 17%~22%之间。
- 2、随着液气比的增大,脱硫脱硝效率有所提高,当 L/G 从 6L/m³ 增加到 20L/m³ 时,SO₂ 和 NO_x 的脱除率均增加了 16%和 9%~12%。
- 3、在一定的范围内,三种吸收剂溶液的浓度对脱硫、脱硝影响均不明显。
- 4、气体温度和吸收剂温度也是影响脱硫脱硝的重要因素,气体温度升高,脱硫效率基本不变,但脱硝效率先下降后上升再趋于平缓;液体温度升高,其脱硫、脱硝效率均下降。
- 5、三种吸收液对脱硫效率基本不随三乙醇胺的浓度变化,说明加入三乙醇胺对吸收 SO₂ 的反应影响不大;但添加剂对脱硝效率影响比较明显,随着添加剂含量的不断升高,其脱硝效率也在不断增加,但对 2# 溶液的促进作用比其它两种稍许好些。当添加剂的含量为 0.01% 时,三种吸收液的脱硝效率随

添加剂含量的增加而提升的幅度均减小。

6、同时脱硫脱硝最佳试验条件为:气流速 0.1m/s,液气比 L/G=14L/m³,添加剂(三乙醇胺)浓度为 0.01% (质量比),系统温度 25℃左右,采用 3 # 溶液为吸收剂(尿素浓度为 3.5%,碳酸氢铵浓度为 3.5%)。在上述条件下,试验得到:脱硫效率为 95%左右,脱硝效率最高达到 60%左右。且 SO₂ 与 NO_x 在同一系统中具有相互促进作用。

References (参考文献)

- [1] Wuyin Wang, Qin Zhong, Zhicheng Ye, Bjerle. Tngemar, Simultaneous reduction of SO₂ and NO_x in an entrained-flow reactor. *Fuel* v74 n2 Feb 1995 267-272.
- [2] Dry simultaneous desulfurization and denitrification. P. NO_x:O₃-052624[J] 3052624 A.
- [3] Donald L Wise, Yiannis A levendis, Girard A Simons, Joseph D. Gresser, Edgar B. Gutoff, C. David Liven good. Control of air toxin particulate and vapor emissions after coal combustion utilizing calcium magnesium acetate. *Conservation and Recycling*. 1996, 16:15~69.
- [4] Edmund S. Baron. Clean coal project nears commercial operation. *Power Engineering*. 1995, 99(2): 31~35.
- [5] JIA Ying; WANG Xun jun & FAN Bing an. ON THE ACIDITY URATUNIAN DISPOSAL OF THE NO_x IN MISSILE OXIDANT WASTEWATER. *Journal of Safety and Environment*. 2002, 2(3).
贾瑛,王焯军,樊秉安.酸性尿素水溶液处理导弹氧化剂废水中氮氧化物[J].安全与环境学报,2002,2(3).
- [6] Cao Zhongyu. Treatment of Containing NO_x Commercial Waste Gas. *Environment Protection in Petrochemical Industry*. 1999(1).
曹忠宇.含氮氧化物(NO_x)工业废气治理[J].石油化工环境保护,1999(1).
- [7] WANG Jun; ZENG Qing-fu; CHEN Lei; LIU Lin, The Intermittent and High Concentration NO_x Exhaust Gas Disposal Technology. *Journal of Wuhan Textile S.n.T. Institute*. 2003, 16(5).
王军,曾庆福,陈磊,刘霖.间歇式高浓度氮氧化物废气的治理技术[J].武汉科技学院学报.2003,16(5).
- [8] WANG Shu-jiang; YANG Ji; LIU Gui-ying; SHI Xiu-min. Study on the removal of nitrogen oxides from carbon dioxide. *Journal of Jilin Institute of Chemical Technology*, 2004, 21(3)
王树江,杨骥,刘桂英,石秀敏.二氧化碳气体中氮氧化物去除的研究[J].吉林化工学院学报.2004,21(3).
- [9] CEN Chao-ping. Study on Simultaneous Desulfurization and Denitrification from Flue Gas Using Urea-Additive Solution. *Guangzhou: South China University of Technology*. 2000.
岑超平.尿素添加剂湿法烟气同时脱硫脱氮研究[D].广州:华南理工大学,2000.
- [10] CEN Chao-ping; GU Guo-bang. Thermodynamic Analysis of Reaction in Simultaneous Desulfurization and Denitrification of Flue Gas Using Urea Solution. *Environmental Science and Technology*, 2004, 27(5):7~8.
岑超平,古国榜.尿素湿法烟气同时脱硫脱氮反应热力学分析[J].环境科学与技术,2004,27(5):7~8.
- [11] Cen Chaoping, Gu Guobang. Simultaneous Desulfurization and Denitrification from Flue Gas by Using Urea/Additive Solution(I): Kinetic Equation of Urea Consumption in Absorption Reaction. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2004, 32(1):37-40. (in Chinese)
岑超平,古国榜.尿素/添加剂湿法烟气同时脱硫脱氮研究(I)——吸收反应中尿素消耗的动力学方程[J].华南理工大学学报,2004,32(1):37~40.

- [12] Cen Chaoping, Gu Guobang. Simultaneous Desulfurization and Denitrification from Flue Gas by Using Urea/Additive Solution(II):Absorption Characteristics of SO₂ and NO_x in Cleaning Process. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2004, 32(2): 14-17. (in Chinese)
岑超平,古国榜.尿素/添加剂湿法烟气同时脱硫脱氮研究(II)——净化过程中SO₂和NO_x的吸收特性[J].华南理工大学学报,2004,32(2):14~17
- [13] Lei Ming, Cen Chaoping, Hu Jiangjun. Study on the Experiment of Simultaneous Removal of SO₂ and NO_x Using Urea/KMnO₄ Solution. *Research of Environmental Sciences*, 2006,1 9(1): 43~45.
雷鸣,岑超平,胡将军.尿素/KMnO₄湿法烟气脱硫脱氮的试验研究[J].环境科学研究,2006,1 9(1): 43~45.
- [14] Wang Zhikui(王志魁). *Principles of Chemical Engineering*[M]. Second edition. BeiJing: Chemical Industry Publishing House,1998,186~18
- [15] Jiang Wenju(蒋文举), Ning Ping(宁平). *Air Pollution Control Engineering*[M]. ChengDou: Sichuan University Publishing House,2001, 142~147.